

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Eisenmann, Jeannine

Modellversuche zur Belastbarkeit technisch-biologischer Ufersicherungen in einem Wellenbecken

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101893>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Eisenmann, Jeannine (2010): Modellversuche zur Belastbarkeit technisch-biologischer Ufersicherungen in einem Wellenbecken. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Alternative technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen - Wirkungsweise, Belastbarkeit, Anwendungsmöglichkeiten. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 41-50.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Modellversuche zur Belastbarkeit technisch-biologischer Ufersicherungen in einem Wellenbecken

Jeannine Eisenmann, BAW Karlsruhe

1 Einleitung

Geböschte Ufer von Binnenwasserstraßen werden in der Regel mit technischen Deckwerken aus Steinschüttungen dauerhaft vor Erosionen und anderen negativen Auswirkungen infolge schiffsinduzierter hydraulischer Belastung gesichert. Zur Dimensionierung technischer Ufersicherungen können diverse Regelwerke und Merkblätter wie z. B. GBB (2004) und MAR (2008) herangezogen werden.

Da die natürliche Ufergestaltung von Binnenwasserstraßen mit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie zunehmend an Bedeutung gewinnt, sollen verstärkt technisch-biologische Ufersicherungen zur Anwendung kommen. Für technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen gibt es derzeit keine Bemessungsregeln. Die vorhandenen Erfahrungen beziehen sich größtenteils auf Gewässer, deren Ufer keine oder nur geringen schiffsinduzierten hydraulischen Belastungen ausgesetzt sind (siehe z. B. Gerstgraser, 2000).

Die Bundesanstalt für Wasserbau führt zusammen mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde seit 2004 das FuE-Projekt "Alternative technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen" durch. Die Untersuchungen umfassen bisher überwiegend die Auswertungen von Wasserstraßenabschnitten, in denen bereits lokal technisch-biologische Ufersicherungen angewendet wurden. Für die Entwicklung von Bemessungsregeln sollen im nächsten Schritt wissenschaftliche Untersuchungen zur Wirkungsweise und Belastbarkeit ingenieurbologischer Ufersicherungen insbesondere unter schiffsinduzierter hydraulischer Belastung durchgeführt werden. Hierfür werden im Folgenden Untersuchungen der Belastbarkeit technisch-biologischer Ufersicherungen in einem Wellenbecken vorgestellt.

2 Untersuchungsgegenstand und Methodik

Ziel ist es, die Belastbarkeit verschiedener technisch-biologischer Ufersicherungen im Hinblick auf schiffsinduzierte hydraulische Belastungen zu erfassen und möglichst auch zu quantifizieren.

Die schiffsinduzierten hydraulischen Belastungen auf die Ufer resultieren i. W. aus der Wasserverdrängung des fahrenden Schiffs in einem räumlich begrenzten Wasserquerschnitt. Dadurch entsteht unter und neben dem Schiff eine Rückströmung vom Bug zum Heck hin und in deren Folge ein Absenk des Wasserspiegels. Am Heck des Schiffes wird der Wasserspiegelabsenk durch die Heckquerwelle mit der Wiederauffüllungsströmung wieder ausgeglichen. Neben diesem so genannten Primärwellensystem entstehen von Bug und Heck ausgehend Sekundärwellen (siehe Bild 1). Beim Absenk des Wasserspiegels in der Wasserstraße können Porenwasserüberdrücke im am Ufer anstehenden Boden aufgrund der Kompressibilität des ungesättigten Grundwassers entstehen (siehe Holfelder, Kayser 2006). Diese Porenwasserüberdrücke können Versagensmechanismen der Böschung wie z. B. die hydrodynamische Bodenverlagerung verursachen (siehe Holfelder, Kayser 2006).

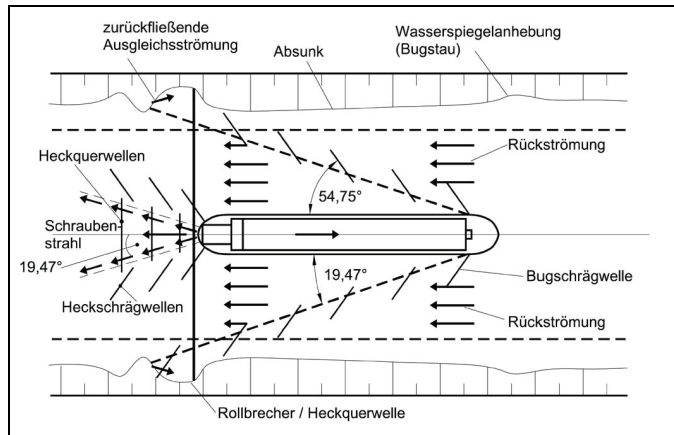


Bild 1: *Wasserspiegelverformung an einem begrenzten Querschnitt in der Draufsicht: ungünstigste Überlagerung der schiffsinduzierten Wellen*

In einem Wellenbecken auf dem Gelände der Bundesanstalt für Wasserbau werden zum Vergleich eine geböschte sowohl technische als auch ingenieurbologische Ufersicherung mit Wellen belastet. Untersucht werden die Einflüsse unterschiedlicher technisch-biologischer Ufersicherungen auf die auflaufende Welle und die Belastbarkeit dieser Ufersicherung gegenüber senkrecht auf- und ablaufender Wellenbelastung und dem daraus resultierenden Porenwasserüberdruck im Untergrund. Im Vorfeld wurden mit einem losen Deckwerk die mit der Wellenmaschine erzeugbaren möglichen Wellenhöhen und -perioden erfasst.

Bei den hier beschriebenen Untersuchungen mit technisch-biologischen Ufersicherungen im Wellenbecken handelt es sich um Vorversuche mit Erosionsschutzmatten, die üblicherweise im Straßenbau oder zum Schutz kleinerer Fließgewässer eingesetzt werden. Die verwendete Messtechnik wird getestet und optimiert. In zukünftigen Versuchen sollen neben weiteren unbegrünten Erosionsschutzmatten auch begrünte Erosionsschutzmatten, Weidenspreitlagen, Steinschüttungen mit Weidenstecklingen und vorgezogene Röhrichtmatten getestet werden.

3 Versuchseinrichtung

3.1 Wellenbecken

Das Wellenbecken ist eine Versuchseinrichtung zur Untersuchung von geböschten Ufersicherungen unter schiffahrtsbedingten Wellen- und Absunkbelastungen (siehe Bild 2).

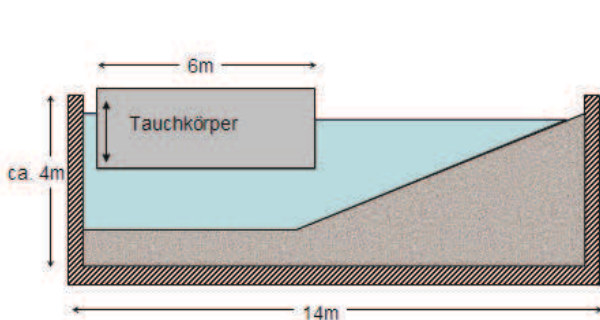


Bild 2: *Wellenbecken der Bundesanstalt für Wasserbau: links: Prinzipskizze, rechts: Foto*

Die Böschungsgrube ist ein mit Wasser gefülltes Becken mit einer Länge von 14 m, einer Breite von 8 m und einer Tiefe von etwa 4 m. An der einen Schmalseite befindet sich eine etwa 1:3 geneigte Böschung (auch andere Neigungen sind möglich) aus stark feinsandigem Mittelsand, die als Untergrund der zu untersuchenden Ufersicherung dient. Am anderen Beckenende ist ein Tauchkörper installiert, der sich mittels eines hydraulischen Antriebs im Wasser auf und ab bewegt und so einen schnellen Wasserspiegelabsenk bzw. -anstieg verursacht.

Durch Variation der Haltezeit und der Senk- und Hubgeschwindigkeit des Tauchkörpers können diverse Wellen erzeugt werden, die sich in ihrer Wellenhöhe und Wellenperiode unterscheiden und so zu unterschiedlichen Absunkereignissen führen.

3.2 Messtechnik

Die Einwirkungen wie Höhe, Periode, Geschwindigkeit und Kraft der auflaufenden Welle werden aufgezeichnet. Auch die aus der hydraulischen Belastung resultierenden Porenwasserdrücke auf und in der Böschung werden erfasst. Eine Übersicht der hierfür verwendeten Messtechnik ist in Tabelle 1 gegeben:

Tabelle 1: Überblick der verwendeten Messtechnik für die Modellversuche

Parameter	Gerät	Einheit	Messbereich	Messgenauigkeit
Wellenhöhe	Ultraschallsensor	m	0,3 ÷ 4,9 m	± 0,98 cm
Geschwindigkeit der auflaufenden Welle (x-, y-, z-Richtung)	ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)	m/s	0 ÷ 7 m/s	± 0,045 m/s
Kraft (x-, y-, z-Richtung)	Kraftsensor in einer Messkugel (Kugelteppich)	N	x-Richt.: 0 ÷ 290 N y-Richt.: 0 ÷ 290 N z-Richt.: 0 ÷ 580 N	x-Richt.: ± 2,9 N y-Richt.: ± 2,2 N z-Richt.: ± 4,4 N
Porenwasserdruck	Absolute Drucksonden	mbar	0 ÷ 1.500 mbar	± 4,05 mbar
	Relative Drucksonden	mbar	0 ÷ 200 mbar	± 0,4 mbar

Die Messrichtungen der Kraft- und Geschwindigkeitsaufnehmer sind wie folgt festgelegt: Die x-Richtung verläuft entgegen der Böschungsfallrichtung, die y-Richtung parallel zur Uferböschung und die z-Richtung verläuft senkrecht zur Böschungsfalllinie in die Böschung hinein.

Je Ufersicherungsart kommt ein Messquerschnitt zum Einsatz, der aus einem Ultraschallsensor, einer Geschwindigkeitssonde und mehreren Drucksonden besteht. Die auf die Böschung wirkenden Kräfte werden nur in Böschungsmitte erfasst. Beispielhaft ist in Bild 3 ein Messquerschnitt dargestellt.

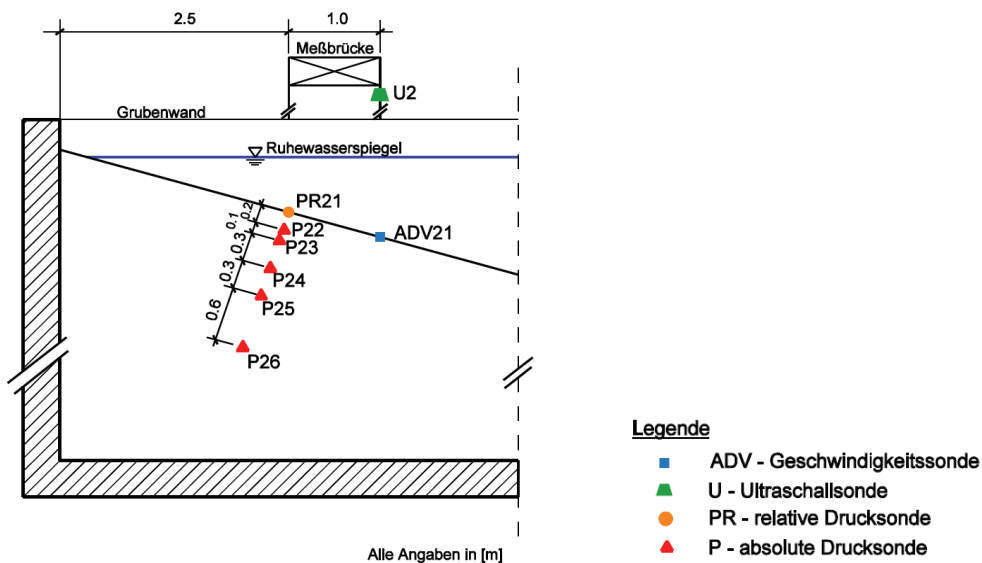


Bild 3: In die Uferböschung eingebrachter Messquerschnitt des Bereichs 2

3.3 Erzeugbare hydraulische Belastungen

Durch Versuche mit einem technischen Deckwerk werden im Vorfeld die durch die diversen Regelungseinstellungen des Tauchkörpers möglichen hydraulischen Belastungen erfasst. Schiffswellen lassen sich mit der Wellenmaschine nicht originalgetreu simulieren, trotzdem ist es möglich, wichtige Phänomene wie z. B. die Auswirkungen des Wasserspiegelabsinks zu untersuchen und Belastbarkeiten zu testen. Die Böschung wird mit einem losen Deckwerk gesichert. Über dem anstehenden Boden ist ein Geotextil verlegt, darüber folgt eine 40 cm mächtige Schicht aus losen Granit-Wasserbausteinen der Klasse CP_{90/250}. Nach Überprüfung der Messgenauigkeit der eingebauten Messtechnik werden bei gefülltem Wellenbecken die Absenk- und Hubgeschwindigkeiten (v) sowie die Haltezeiten (h) des Tauchkörpers variiert. So werden insgesamt 16 verschiedene Regelungseinstellungen getestet. In Tabelle 2 sind die dadurch resultierenden hydraulischen Belastungen mit ihren Minima und Maxima dargestellt.

Tabelle 2: Aufbringbare Wellenbelastungen im Wellenbecken (gemessen bei technischer Ufersicherung)

Belastung	Gemessene Werte
Wellenhöhen (entsprechen folgenden Absunktiefen)	50 ÷ 88 cm (25 ÷ 44 cm)
Wellenperioden (entsprechen folgenden Absunkzeiten)	9 ÷ 21 s (2,3 ÷ 5,3 s)
Geschwindigkeiten der auflaufenden Wellen	v_x : -2,4 ÷ 2,2 m/s v_y : -2,4 ÷ 1,7 m/s v_z : -0,8 ÷ 0,8 m/s
Kräfte der auflaufenden Wellen	F_x : -52 ÷ 117 N F_y : -48 ÷ 30 N F_z : -62 ÷ 42 N

Schon in diesen ersten Versuchen zeigt sich, dass die mit den Regelungseinstellungen entstehenden Wellenhöhen und Wellenperioden nur teilweise reproduzierbar sind. Die Unterschiede liegen im Zentimeter- bzw. Sekundenbereich. Für die Tests technisch-biologischer Ufersicherungen wurden die Einstellungen v2h1 (Wellenhöhe ca. 56 cm, Wellenperiode ca. 21 s) und v3h1 (Wellenhöhe ca. 58 cm, Wellenperiode ca. 16 s) gewählt.

4 Vorversuche mit Erosionsschutzmatten

4.1 Aufbau

Zwei verschiedene technisch-biologische Ufersicherungen werden jeweils auf einer Fläche von etwa 4 m x 4 m eingebaut. Dabei handelt es sich um verschiedene Erosionsschutzmatten in Kombination mit Weidenstecklingen (Bereich 1) oder Röhrichtpflanzen (Bereich 2).

In beiden Bereichen sind die Erosionsschutzmatten böschungsparell verlegt und an ihren Rändern jeden laufenden Meter mit 20 cm langen Eisenheringen in der Böschung befestigt. In Bereich 1 werden 40 cm lange Weidenstecklinge der Purpur- und Korbweide (*Salix purpurea*, *Salix viminalis*) in einem böschungsparellem Abstand von 30 cm und mit einem Abstand in Böschungsfallrichtung von 50 cm senkrecht in die Böschung eingebracht. In Bereich 2 werden in einem Abstand von 30 cm x 30 cm Schilf (*Phragmites australis*) und Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) eingebracht (siehe Bild 4).

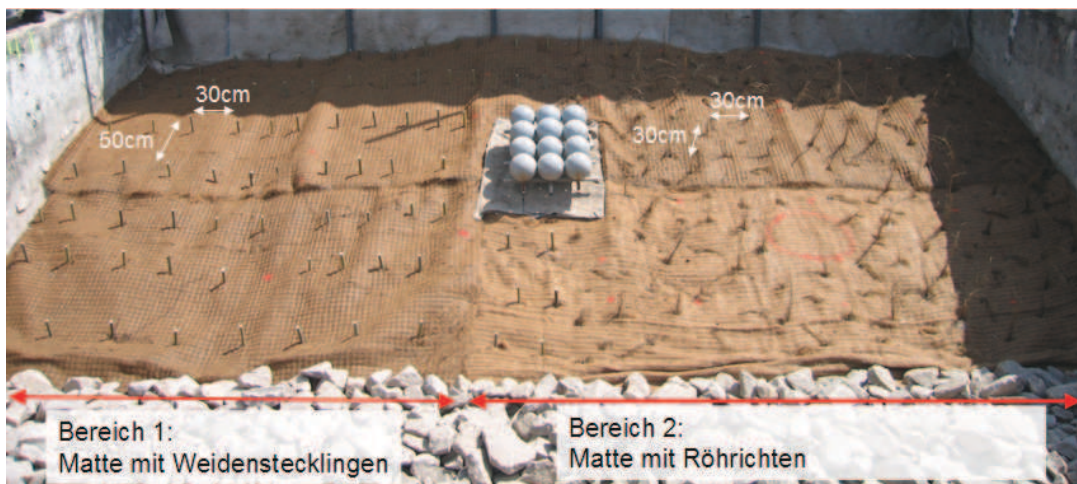
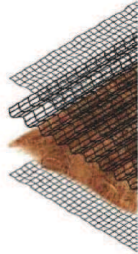



Bild 4: Technisch-biologische Ufersicherung direkt nach ihrem Einbau im Wellenbecken (in der Mitte: Kugelteppich zur Kraftmessung)

Als Erosionsschutzmatten wurden in diesen Vorversuchen zunächst Matten verwendet, wie sie üblicherweise im Straßenbau oder als Erosionsschutz an kleinen Fließgewässern eingesetzt werden. Die Matten bestehen aus Kokosmaterial, welches zwischen Lagen von Polypropylnetzen eingebracht ist. Die Erosionsschutzmatte 2 besitzt auf Ober- und Unterseite jeweils nur ein einfaches Netz mit Maschenweiten von 1,3 cm x 1,3 cm, während die Erosionsschutzmatte 1 ein weiteres dreidimensionales Polypropylnetz derselben Maschenweite aufweist und dadurch eine höhere Zugfestigkeit besitzt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Materialeigenschaften der verwendeten Erosionsschutzmatten

	Erosionsschutzmatte 1	Erosionsschutzmatte 2
Bild		
Gewicht	450 g/m ²	350 g/m ²
Oberes Trägermaterial	Polypropylen Maschenweite: 1,3 cm x 1,3 cm	Polypropylen Maschenweite: 1,3 cm x 1,3 cm
Mittleres Trägermaterial	3-dimensionales Polypropylenetz	-
Füllmaterial	100 % Kokosfaser	100 % Kokosfaser
Unteres Trägermaterial	Polypropylen Maschenweite: 1,3 cm x 1,3 cm	Polypropylen Maschenweite: 1,3 cm x 1,3 cm
Zugfestigkeit längs	9,6 kN/m	k. A.
Zugfestigkeit quer	13,3 kN/m	k. A.
Grenzscherfestigkeit	144 kN/m ²	k. A.

4.2 Versuchsdurchführung- hydraulische Belastungen

Insgesamt wurden bisher 4 Versuche mit hydraulischer Wellenbelastung an der technisch-biologischen Ufersicherung durchgeführt. Die gewählten Regelungseinstellungen der Wellenmaschine führten mit dem geänderten Uferaufbau zu veränderten Wellenhöhen und -perioden. So sind für die gewählten Einstellungen folgende Werte entstanden:

Tabelle 4: Gewählte Einstellungen für die Tests mit technisch-biologischen Ufersicherungen (jeweils ca.-Werte)

Einstellung	Wellenhöhe (Absunktiefe)	Wellenperiode (Absunkdauer)
v2h1	44 cm (22 cm)	30 s (7,5 s)
v3h1	56 cm (28 cm)	16 s (4 s)

Der Anfangszustand, in dem kaum bis keine Vegetationsentwicklung stattgefunden hat, ist maßgebend für die Anwendung im Wasserwechselbereich der Wasserstraße. So erfolgte der erste Versuch mit geringer hydraulischer Belastung (v2h1) 2 Wochen nach dem Einbau. Danach folgten Versuche auch mit größeren Wellenbelastungen (v2h1 und v3h1).

4.3 Ergebnisse

Schon bei geringen Wellenbelastungen von wenigen Zentimetern zeigt sich, dass die Erosionsschutzmatten gegenüber dem anstehenden stark feinsandigen Mittelsand nicht filterstabil sind.

Bereits im ersten Versuch hält die Befestigung der Mattenränder mit 20 cm langen Metallheringen den leichten hydraulischen Belastungen nicht stand. Während im Bereich 1 neben den Heringen die Weidenstecklinge eine entscheidende Rolle bei der Befestigung der Matte spielen, entfällt dieser positive Nebeneffekt bei der Ufersicherung mit einzelnen Röhrrichtpflanzen. Die Matte verrutscht unter der aufgetragenen Wellenbelastung (siehe Bild 5). Deshalb wird die Matte nach dem ersten Versuch zusätzlich mit 30 cm langen Holzpflocken und teilweise auch einer Reihe von Wasserbausteinen gesichert.



Bild 5: Bereich 2 nach der ersten Wellenbelastung

Bei stärkeren Wellenbelastungen (Wellenhöhe 56 cm, Wellenperiode 16 s) verliert die Erosionsschutzmatte 2 so an Festigkeit, dass sich die für den Röhrichteinbau eingebrachten Löcher aufweiten und die Matte sich über die einzelnen Röhrichtpflanzen stülpt. Auch die Erosionsschutzmatte 1 mit einer größeren Festigkeit stülpt sich am Rand des Bereichs 1 über die Stecklinge (siehe Bild 7, links oben). Beide Erosionsschutzmatten verformen sich durch die hydraulischen Belastungen. Ein Verbund mit dem anstehenden Boden ist nicht mehr gegeben. Der Boden unter der Matte wird durch Wellenbelastung abgetragen.

Nach den aufgetragenen hydraulischen Belastungen verdeutlicht sich die Auswirkung der mangelnden Filterstabilität der Erosionsschutzmatten: besonders im unteren Böschungsbereich kommt es zu größerem Bodenaustrag senkrecht durch die Matte hindurch (siehe Bild 7). Durch die Wellenbelastung wird zudem die Kokosfüllung teilweise aus den Matten herausgetragen.



Bild 6: Modellversuch unter hydraulischer Belastung mit technisch-biologischer Ufersicherung



Bild 7: *Technisch-biologische Ufersicherung nach hydraulischer Belastung bei abgelassenem Wasserstand (rot umrandet: Schäden)*

5 Zusammenfassung

Die verwendeten Kokosmatten sind gegenüber dem anstehenden stark feinsandigen Mittelsand nicht filterstabil und können das Ufer in der getesteten Versuchsanordnung nicht vor Erosion oder hydrodynamischer Bodenverlagerung sichern. Des Weiteren reichen die Zugfestigkeiten der Matten nicht aus, um diese unter Wellenbelastung dauerhaft vor plastischen Verformungen oder einem Aufweiten der zur Pflanzung eingebrachten Löcher zu schützen. Die Befestigung mit 20 cm langen Heringen an den Rändern und Überlappungen der Matten kann ein Verrutschen der Matten selbst unter geringen hydraulischen Belastungen nicht verhindern.

Die Weidenstecklinge hielten den hydraulischen Belastungen gut stand und blieben fest im Untergrund verwurzelt. Bei den Röhrichtpflanzen erwies es sich schon mit der Einpflanzung schwierig, ein gutes Einbringen in den Untergrund zu ermöglichen. Nach einer Anwachsphase von mehreren Wochen sind jedoch alle Röhrichtpflanzen so angewurzelt, dass sie dies selbst nach den aufgetragenen Wellenbelastungen blieben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl die Materialeigenschaften (Filterstabilität gegenüber dem anstehenden Boden, Zugfestigkeit) als auch die Befestigungsart der im Straßenbau üblichen Kokosmatten auf dem anstehenden mittelsandigen Boden nicht ausreichen, um die Uferböschung im Wellenbecken selbst bei geringen hydraulischen Belastungen vor Erosion und hydrodynamischer Bodenverlagerung zu sichern und eine kraftschlüssige Auflage auf der Böschung zu gewährleisten.

Ein aussagekräftiger Vergleich der gemessenen Parameter unter hydraulischen Belastungen bei einer technischen und einer technisch-biologischen Ufersicherung ist derzeit durch die Unterschiede der entstandenen Belastungen (Wellenhöhe, Wellenperiode) trotz gleicher Regelungseinstellungen nicht möglich.

6 Ausblick

Eine für technisch-biologische Ufersicherungen an Wasserstraßen geeignete Erosionsschutzmatte muss neben biologischer Abbaubarkeit und Durchwurzelbarkeit folgende technische Eigenschaften besitzen: Filterstabilität gegenüber dem anstehendem Boden und eine ausreichende Zugfestigkeit in Längs- und Querrichtung. Als Prüfkriterien für diese geforderten technischen Materialeigenschaften können die Richtlinien zur Prüfung von Geotextilien (RPG, 1994) herangezogen werden.

In weiteren Versuchen zu technisch-biologischen Ufersicherungen mit Erosionsschutzmatten wird eine neue organische Matte, die aus einer Kombination aus Schafschurwolle und Polylactid (biokompatible Polymilchsäuren) besteht, eingesetzt. Zum Vergleich wird auch ein synthetisches Geotextil eingesetzt, das die Anforderungen hinsichtlich Filterstabilität und Festigkeit nachweislich erfüllt. Mit diesem Geotextil lassen sich verschiedene Befestigungsarten der Matte auf der Böschung testen. Es werden sowohl 40 cm lange Stahlkrampen in U-Form als auch 40 cm lange Holzpflocke in leichter T-Form eingesetzt.

Im Rahmen der Vorversuche ist es gelungen, eine geeignete Anwendung für ein zuverlässiges Höhennivellement zu entwickeln, so dass für kommende Versuche die Änderungen in der Böschungsoberfläche als Maß für die Erosion herangezogen werden können. Des Weiteren sollen in weiteren Versuchen vermehrt relative Drucksonden zur Messung der Porenwasserdrucks zum Einsatz kommen. Diese bieten eine größere Messgenauigkeit bei jedoch höherer Sensitivität gegenüber Schäden beim Einbau.

Neben technisch-biologischen Ufersicherungen mit Erosionsschutzmatten sind u. a. weitere Tests mit Sicherungen aus Weidenspreitlagen, Steinschüttungen mit Weidenstecklingen und vorgezogenen Röhrichtmatten geplant.

Literatur

- GBB (2004): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen. Mitteilungsblatt Nr. 87, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- Gerstgraser, C. (2000): Ingenieurb biologische Bauweisen an Fließgewässern. Grundlagen zu Bau, Belastbarkeit und Wirkungsweisen. Dissertation der Universität für Bodenkultur in Wien, Band 52, Österreichischer Kunst- und Kulturverlag
- Holfelder, T., Kayser, J. (2006): Berücksichtigung von Porenwasserüberdrücken bei der Bemessung von Deckwerken an Wasserstraßen. Beiträge zum 5. Geotechnik-Tag in München, Heft 38. Schriftenreihe der Technischen Universität München
- RPG (1994): Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- MAR (2008): Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

